

Sumber Elektron Tiga Elektroda Menggunakan Tabung Pemercepat NEC
untuk MBE-LATEKS 300kV/20 mA (Darsono, dkk.)

p-ISSN: 1410-6957, e-ISSN: 2503-5029
<http://ganendra.batan.go.id>

SUMBER ELEKTRON TIGA ELEKTRODA MENGGUNAKAN TABUNG PEMERCEPAT NEC UNTUK MBE-LATEKS 300KV/20 MA

THE ELECTRON SOURCE WITH THREE ELECTRODES USING NEC ACCELERATOR TUBE FOR EBM -LATEX OF 300 KV/20 MA

Darsono, Suprpto, Taufik

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101, ykbb, Yogyakarta

e-mail: b_darson0@batan.go.id

Diterima 6 September 2017, diterima dalam bentuk perbaikan 28 September 2017), disetujui 9 Oktober 2017

ABSTRAK

SUMBER ELEKTRON TIGA ELEKTRODA MENGGUNAKAN TABUNG AKSELERATOR NEC UNTUK MBE-LATEKS 300kV/20 mA. Pada makalah ini dilaporkan hasil rancangan, konstruksi, dan karakterisasi sumber elektron (SE) tiga elektroda untuk mesin berkas elektron (MBE) lateks dengan memanfaatkan tabung pemercepat buatan NEC (National Electric Corporation) sebagai ruang dan elektroda sumber elektron. Metode yang digunakan dengan merancang flange untuk menempatkan filamen, katoda Pierce, dan anoda pemfokus yang terisolasi dengan katoda, kemudian flange ini dimuatkan pada tabung pemercepat yang telah dilepas 2 elektrodanya sehingga terbentuk struktur sumber elektron 3 elektroda jenis Pierce. Bentuk lintasan berkas elektron pada tabung pemercepat disimulasi menggunakan program komputer OPERA-3D untuk variasi parameter posisi filamen relatif terhadap ujung lubang katoda Pierce 3; 1,5; -1,5; dan -2,5 mm menggunakan 1 tabung pemercepat, dilanjutkan simulasi untuk beda tegangan katoda dan anoda pemfokus 5, 10, dan 15 kV menggunakan 2 tabung pemercepat. Selanjutnya dilakukan konstruksi dan karakterisasi profil dan arus berkas elektron keluarannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada posisi filamen -2,5 mm menghasilkan lintasan berkas elektron paling sedikit divergen dan merambat sejajar pada sumbu aksial 2 tabung pemercepat pada beda tegangan katoda dan anoda pemfokus 15 kV. Profil berkas elektron sangat ditentukan oleh tegangan anoda pemfokus. Besarnya keluaran arus berkas elektron sangat ditentukan oleh tegangan anoda ekstraksi dengan hasil terbesar 50 mA. SE yang dibuat ini memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan untuk MBE lateks.

Kata kunci: sumber elektron tiga elektroda, simulasi OPERA-3D, konstruksi sumber elektron, karakterisasi berkas elektron, MBE

ABSTRACTS

THE ELECTRON SOURCE WITH THREE ELECTRODES USING NEC ACCELERATOR TUBE FOR EBM -LATEX OF 300 kV/20 mA. This paper deals with the results of the design, construction, and characterization of the electron source (ES) with three electrodes for electron beam machines (EBM) of latex process by utilizing accelerator tube of NEC (national electric corporation) as chamber and electrodes of the electron source. The method used is to design the flange for placing filament, Pierce cathode and the focusing anode isolated to the cathode. The flange is loaded to the NEC accelerator tube where two of its electrodes have been previously released thus forming a three electrode ES of Pierce type. Trajectory shape of electron beam on the accelerator tube is simulated by using OPERA-3D computer program for variation parameters such as filament position relative to the Pierce cathode hole edge of 3; 1.5; -1.5; and -2.5 mm using 1 tube accelerator. Then simulation was continued for voltage difference variation of the cathode and anode of 5, 10, and 15 kV using two accelerator tubes. Furthermore, the ES construction and characterization of the beam profile and the electron beam current output have been done. The investigation results show that at the filament position -2.5 mm and at 15 kV voltage difference of cathode and focusing anode it produces an electron beam trajectory at least divergent, the beam propagates parallel to the axial axis of the accelerating tube. Electron beam profile is strongly influenced by focusing anode voltage. The electron beam output is strongly influenced by anode extraction voltage with the largest yield was 50 mA. This home made ES meets the specifications required for the EBM for latex process.

Keywords: electron source with three electrode, OPERA-3D simulation, electron source construction, electron beam characterization, EBM

PENDAHULUAN

Mesin Berkas Elektron (MBE) adalah jenis teknologi akselerator yang banyak digunakan di industri sebagai alat untuk proses iradiasi suatu produk industri. Pemanfaatan MBE yang menonjol dalam bidang industri di Indonesia adalah untuk proses *cross-linking* ban mobil, isolasi kabel, busa plastik (*foam*), dan untuk sterilisasi alat medik [1-3]. Prospek lainnya di Indonesia adalah untuk pravulkanisasi lateks karet alam [4].

Salah satu komponen utama MBE adalah sumber elektron (SE) yang berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron. Pada MBE berkas elektron ini akan dipercepat di dalam tabung pemercepat, dipandu oleh sistem pemfokus, dan dimayarkan (*scanning*) oleh magnet pemayar pada corong pemayar serta dikeluarkan melalui jendela lembaran tipis Ti (*Ti foil window*) untuk digunakan pada proses iradiasi suatu produk industri. Penggunaan SE tidak hanya untuk MBE tetapi juga untuk piranti tabung gelombang mikro (seperti *tetrodes*, *klystron*, *gyrotron*) [5] dan untuk pengelasan [6] serta TV, SEM, TEM, *X-ray source* dan *electron Linac* [7].

Masalah utama dalam konstuksi SE adalah isolasi antar elektrodanya karena tidak mudah menyambung tabung metal dan keramik yang dapat digunakan untuk vakum tinggi. Untuk mengatasi hal ini, dalam merancang bangun MBE 300 kV//20 mA untuk pra vulkanisasi lateks karet alam (MBE lateks) di PSTA-BATAN, yaitu dengan memanfaatkan tabung pemercepat buatan NEC sebagai bagian dari SE. Telah berhasil dibuat SE jenis Pierce dua elektroda dengan memanfaatkan tabung pemercepat NEC yaitu dengan melepas satu elektroda pemercepatnya untuk ruang SE [8]. Filamen dan katoda Pierce menyatu pada *flange* dirancang demikian rupa sehingga ketika *flange* dipasangkan pada tabung pemercepat maka jarak antara katoda dan elektroda pertama pemercepat yang digunakan sebagai anoda ekstraksi tidak terlalu jauh. Modul SE ini telah diuji fungsi dan dapat menghasilkan arus berkas elektron 55 mA.

Namun didasarkan dari hasil pengujian setelah dirakit menjadi satu kesatuan pada MBE lateks dihasilkan berkas elektron yang tidak sejajar dengan sumbu tabung pemercepat sehingga sebagian berkas menumbuk dinding corong pemayar dan *flange* jendela Ti. Dengan kata lain berkas elektron tidak mengenai di tengah jendela Ti. Hal ini diduga karena pembentukan berkas elektron tergantung pada tegangan anoda ekstraksi dari pemercepat. Untuk tegangan operasi MBE lateks yang berbeda maka beda tegangan antara katoda dan anoda ekstraksi berbeda sehingga menghasilkan berkas elektron yang mengenai jendela Ti pada posisi yang berbeda dan profilnya tidak rata. Berkas elektron yang menumbuk *flange* energinya akan terdisipasi menjadi panas dan akan merusak pada bagian yang ditumbuk.

Untuk mengkonstruksi MBE lateks yang dapat menghasilkan berkas elektron dengan kuantitas dan kualitas yang optimal tidaklah mudah. Parameter kuantitas dan kualitas berkas elektron meliputi intensitas berkas elektron (arus dan energi), profil berkas dan lintasan berkas elektron [9]. Mengatasi kebutuhan tersebut maka dilakukan peningkatan kualitas berkas elektron dengan membuat modul SE jenis Pierce menggunakan 3 elektroda. Dalam hal ini dengan menyisipkan elektroda di antara katoda dan anoda ekstraksi pada tabung pemercepat dan melepas 2 elektroda tabung pemercepat. Elektroda ini menyatu dengan *flange* katoda dan filamen namun terisolasi dengannya secara elektrik. Untuk mencatu tegangan pada elektroda ini maka dirancang agar kontak dengan elektroda ke dua dari tabung pemercepat. Tujuan menyisipkan elektroda ini untuk mengatur bentuk berkas elektron yang diekstraksi dan dipercepat pada tabung pemercepat. Diharapkan SE jenis Pierce 3 elektroda ini dapat mengatasi masalah kuantitas dan kualitas berkas elektron MBE lateks. Untuk mewujudkan modul SE jenis Pierce 3 elektroda dilakukan langkah perhitungan parameter penting sumber elektron dengan menggunakan formulasi baku, melakukan simulasi pada tabung pemercepat sesungguhnya yang digunakan pada MBE lateks menggunakan program komputer OPERA-3D, mengkonstruksi, dan mengkarakterisasi keluaran berkas elektronnya.

METODOLOGI

Formulasi Rancangan Sumber Elektron

Dalam merancang sumber elektron ada dua hal penting yang harus diperhitungkan yaitu rapat arus jenuh emisi elektron yang dihasilkan katoda panas (filamen) di dalam ruang sumber elektron, dan besarnya arus emisi elektron yang dapat diekstraksi dari ruang sumber elektron. Densitas arus jenuh emisi elektron (A/cm^2) sebagai fungsi suhu pemanasan akibat filamen yang dialiri arus, besarnya mengikuti persamaan Richardson-Dushman sebagai berikut [10,11]:

$$J_{eT} = AT^2 e^{\left(-\frac{\phi}{kT}\right)} \quad (1)$$

dengan A adalah konstanta Richardson ($A/cm^2 K^2$), ϕ fungsi kerja (eV), k tetapan Boltzmann (eV/K) dan T suhu pemanasan (K). Nilai A tergantung pada jenis bahan filamen (katode). Persamaan (1) merupakan persamaan yang menyatakan hubungan emisi elektron di sekitar ruang posisi filamen dan suhu pemanasan filamen. Dari persamaan (1) bahwa untuk suhu filamen tertentu maka rapat arus jenuh emisi elektron dapat dicapai jika medan listrik di depan permukaan filamen cukup kuat, sebaliknya maka awan elektron akan terbentuk di depan permukaan katoda. Awan elektron (muatan ruang) ini dapat mengubah konfigurasi medan listrik sehingga emisi elektron dari permukaan katoda terbatas. Agar berkas elektron dapat dikeluarkan atau diekstraksi dari ruang tersebut maka diperlukan medan listrik yang kuat dengan arah dari anoda menuju ke katoda. Besarnya medan listrik ini tergantung tegangan anoda karena jarak anoda ke katoda tetap.

Besarnya densitas arus emisi elektron yang dibatasi oleh muatan ruang yang dapat diekstraksi dari ruang sumber elektron ke ruang tabung pemercepat mengikuti Hukum Child-Langmuir [11]:

$$J_{eQ} = 2,3 \times 10^{-6} KV^{3/2} \quad (2)$$

di mana J_{eQ} densitas arus berkas elektron terekstraksi yang terukur dalam A/cm^2 dan V tegangan anoda ekstraksi atau beda tegangan antara katoda dan anoda dalam volt, dan K adalah konstanta dalam cm^{-2} . Untuk elektroda yang paralel besarnya $K=1/d^2$ dengan d adalah jarak antara katoda dan anoda. Dari persamaan (2) dapat didefinisikan *perveance* (P) dari sumber elektron seperti ditunjukkan pada persamaan (3) dengan I_b adalah arus berkas elektron dalam ampere (A) dan satuan *perveance* adalah $AV^{-3/2}$. *Perveance* dapat digunakan untuk mengkarakterisasi efek muatan ruang.

$$P = I_b V^{-3/2} \quad (3)$$

Perveance dipengaruhi muatan ruang, dan muatan ruang ini tergantung pada geometri dari sumber elektron (bentuk filamen, bentuk katoda, bentuk anoda, dan ruang yang dibentuk oleh ketiganya). Jika P dari suatu sumber elektron lebih rendah dari $10^{-8} AV^{-3/2}$ maka efek muatan ruang dapat diabaikan dibanding parameter sumber elektron lainnya [11]. Untuk sumber elektron jenis elektroda Pierce dengan katoda dan anoda yang sejajar maka persamaan (2) dan (3) dapat ditulis menjadi persamaan (4):

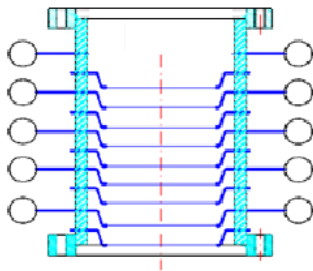
$$J_{eQ} = P \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (4)$$

Dari persamaan (4) terlihat bahwa berkas arus elektron yang tinggi dapat diperoleh dengan meningkatkan *perveance*, serta tegangan anoda ekstraksi. Dengan menentukan besarnya *perveance* yang dikehendaki dan d tertentu maka besarnya rapat arus berkas elektron sebagai fungsi tegangan ekstraksi anoda dapat dihitung.

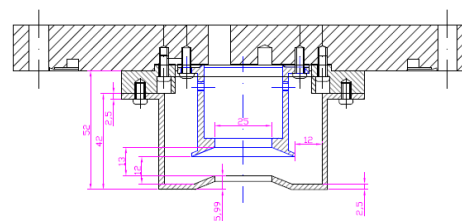
Struktur dan Simulasi Sumber Elektron

Tabung pemercepat buatan NEC (*National Electric Corporation*) yaitu *general purpose accelerating tube* tipe 2 JA 004150 (NEC *Flanges*) digunakan sebagai ruang sumber elektron dengan cara melepas dua elektrodanya seperti ditunjukkan pada Gambar 1a. Tabung pemercepat ini mempunyai 10 elektroda dengan jarak antar elektrodanya 19 mm, dan diameter celah elektrodanya 101 mm. Dudukan filamen, katoda Pierce, dan anoda pemfokus dirakit pada satu *plate flange* DN-160 CF sesuai dengan *flange* tabung pemercepat seperti ditunjukkan pada Gambar 1b. Dudukan filamen, dan katoda Pierce menyatu dengan *flange* DN-160 CF (*flange* katoda) sedangkan anoda pemfokus terisolasi dengan *flange*. Bentuk geometri anoda pemfokus didesain sejajar dengan bentuk geometri katoda Pierce dan dapat bersentuhan dengan elektroda ke dua dari tabung pemercepat. *Flange* pada Gambar 1b dimuat pada tabung pemercepat Gambar 1a sehingga terbentuk struktur sumber elektron termionik tiga elektroda jenis Pierce dengan anoda pada elektroda ke tiga dari tabung pemercepat seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Filamen termionik bentuk spiral digunakan pada sumber elektron ini. Spesifikasi sumber elektron yang didesain seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

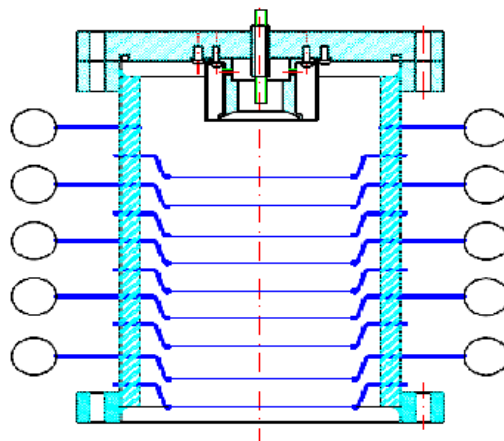
Sumber elektron ini nantinya digunakan pada rancangbangun MBE lateks untuk proses iradiasi latek alam. MBE dirancang pada 300 kV/20 mA dengan tabung pemercepat berada di dalam bejana bertekanan 7×10^5 Pa. Untuk keperluan tersebut hanya diperlukan 2 tabung akselerator sehingga diperlukan jumlah elektroda pemercepat yang digunakan sebanyak 18. Untuk melakukan simulasi transportasi atau lintasan berkas elektron pada tabung akselerator MBE ini pertama dibuat model simulasi yang meliputi sumber elektron dan 18 elektroda pemercepat. Model simulasi digambar menggunakan modul *modeler* pada program *Opera-3D* dalam 3 dimensi sesuai dengan susunan dan ukuran sebenarnya seperti data pada Tabel 1 dan Gambar 2 dengan menambah 1 tabung pemercepat.



Gambar 1a. Tabung akselerator buatan NEC.



Gambar 1b. Flange dudukan filamen, katoda, dan anoda pemfokus.



Gambar 2. Struktur sumber elektron 3 elektroda jenis Pierce.

Tabel 1. Spesifikasi sumber elektron tiga elektroda jenis Pierce.

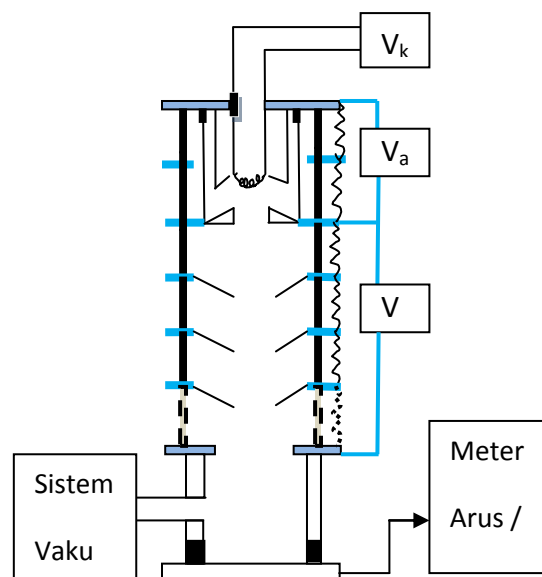
No	Paramater	Spesifikasi
1	Filamen	Bahan Tungsten, bentuk spiral diameter 15 mm, diameter kawat 0,5 m
2	Katoda	Bentuk Pierce, diameter lubang 25 mm
3	Anoda pemfokus	Bentuk Pierce, diameter lubang 20 mm
4	Anoda	Bentuk sesuai elektroda tabung pemercepat NEC
5	Jarak filamen-anoda pemfokus	10 mm
6	Jarak filamen-anoda ekstraksi	38 mm
7	Jarak elektroda tabung pemercepat	19 mm
8	Flange katoda	DN-160 CF

Simulasi lintasan berkas elektron dilakukan menggunakan program komputer *Opera-3D* dengan berbasis *Finite Element Method* (FEM). Untuk menjalankan program ini diperlukan data medan listrik yang berasal dari hasil perhitungan program komputer *Tosca*. Kedua program ini mempunyai akurasi lebih besar 98% dan telah banyak digunakan untuk merancang komponen maupun sistem akselerator partikel. Dengan simulasi tersebut, beberapa parameter divariasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap lintasan berkas elektron. Variasi parameter meliputi variasi tegangan katoda-anoda, dan variasi jarak sumber elektron terhadap anoda karena parameter ini akan mempengaruhi pada *cross-over* dari lintasan berkas elektron. Bentuk filamen spiral tidak mudah dimodelkan maka pada simulasi ini bentuk filamen dibuat bentuk lempeng speris. Asumsi pemodelan bentuk speris untuk mengetahui lintasan dan profil berkas elektron masih dapat diterima. Bentuk speris memang akan menghasilkan densitas arus berkas elektron lebih besar dari pada bentuk spiral, namun demikian efek muatan untuk orde arus beberapa mA tidak signifikan mempengaruhi profil berkas elektron, orde penyimpangan diperkirakan di bawah 5%.

Konstruksi dan Karakterisasi Sumber Elektron

Struktur sumber elektron pada Gambar 2 kemudian dibuat rancangan detail dan dikonstruksi menggunakan fasilitas bengkel mekanik yang ada di PSTA-BATAN. Setelah selesai komponen sumber elektron difabrikasi kemudian dirakit dan dilakukan karakterisasi meliputi bentuk profil berkas elektron dan arus keluarannya. Bentuk profil berkas diamati sebagai fungsi tegangan elektroda pemfokus dan tegangan anoda. Juga dilakukan karakterisasi arus keluaran sumber elektron sebagai fungsi tegangan anoda, dan arus filamen.

Adapun skema karakterisasi sumber elektron seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pengukuran profil berkas menggunakan metode seperti dijelaskan oleh Darsono dkk. [12] yaitu menggunakan bahan pendar. Bentuk profil berkas elektron yang terbentuk akibat interaksi berkas elektron dan bahan pendar direkam menggunakan CCTV yang dihubungkan ke Laptop menggunakan antar muka *video capture USB.2.0*. Pengamatan profil berkas elektron dilakukan pada arus filamen yang tetap, untuk tegangan anoda pemfokus dan anoda yang berbeda. Pengukuran keluaran arus berkas elektron dari sumber elektron dilakukan menggunakan cawan Faraday yang diinginkan menggunakan air agar mampu mengukur arus orde puluhan mA.



Gambar 3. Skema percobaan karakterisasi sumber elektron.

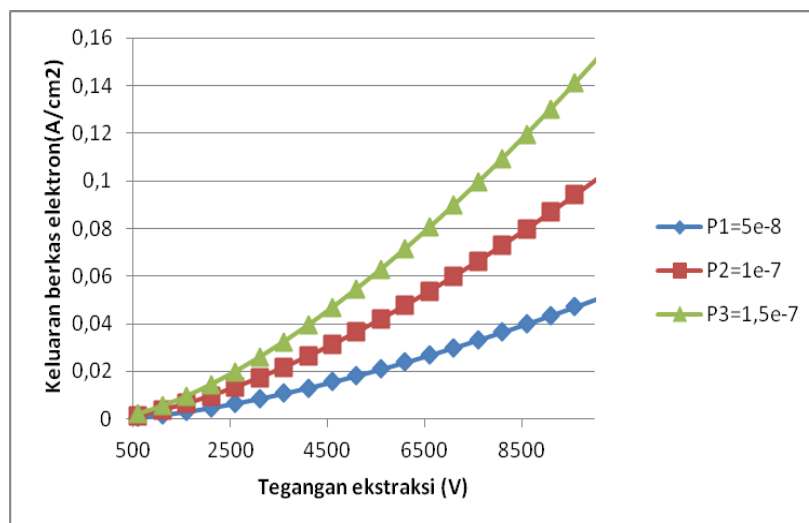
HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan dan Simulasi Sumber Elektron

Besarnya arus jenuh emisi elektron per satuan luas yang dipancarkan oleh katode sangat dipengaruhi oleh suhu operasi dan sifat bahan katode seperti ditunjukkan pada persamaan (1). Dalam penelitian ini sumber

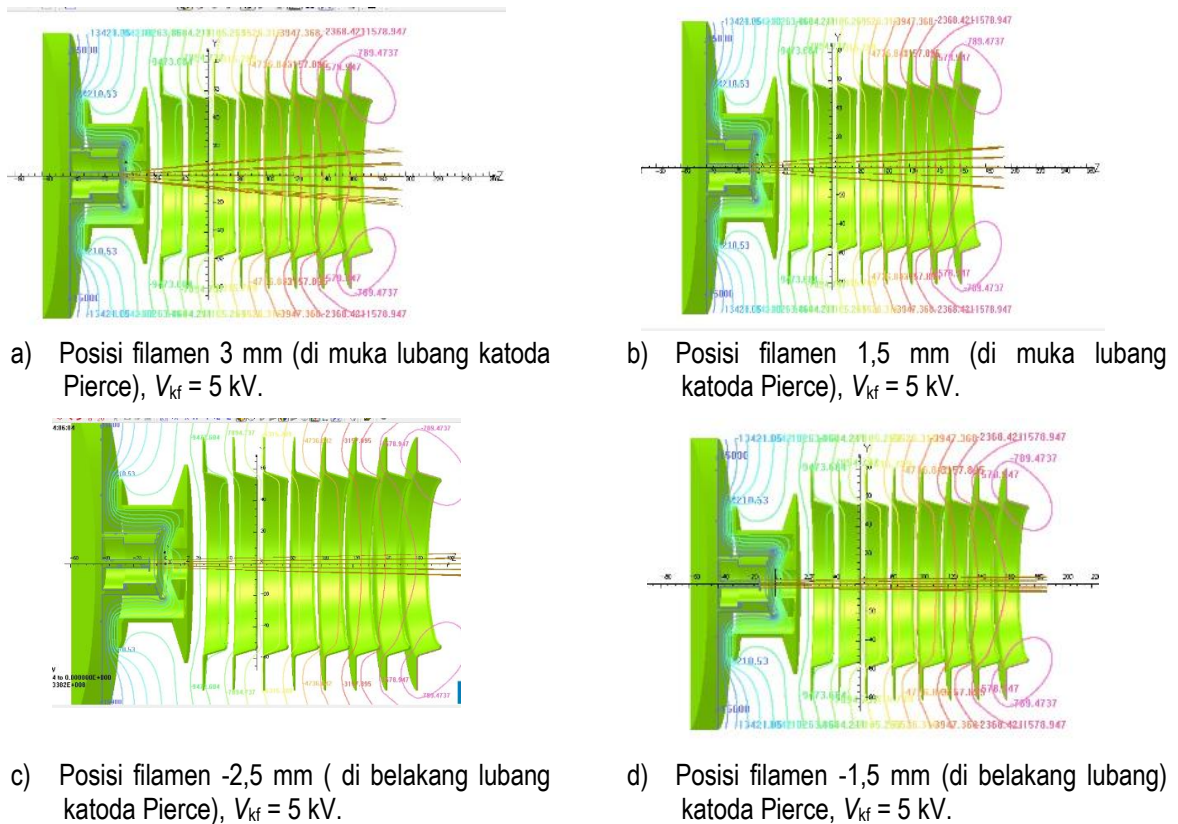
elektron tiga elektroda jenis Pierce didesain menggunakan katode dari bahan kawat tungsten (W) berdiameter 0,5 mm dan dibentuk spiral dengan diameter sperial 15 mm. Untuk filamen tungsten besarnya *work function* orde 4,32 eV, titik leleh 3695 K sedangkan besarnya konstanta *A* orde $1,20173 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$, maka pada suhu filamen 61% titik leleh yaitu 2254 K besarnya arus jenuh emisi elektron yang dihasilkan adalah 132 mAcm^{-2} . Arus ini jauh dari cukup untuk menghasilkan keluaran arus berkas elektron dari MBE lateks sebesar 20 mA. Berdasarkan percobaan untuk sumber elektron dioda jenis Pierce pada suhu operasi 2200 K dengan katode dari bahan tungsten (W) berdiameter 0,5 mm dan dibentuk spiral dengan diameter sperial 15 mm mampu menghasilkan luaran arus berkas elektron sampai dengan 50 mA [8]. Berdasarkan persamaan (4) dan data pada Tabel 1 serta Gambar 2 dapat diprediksi besarnya berkas arus emisi elektron yang dapat diektraksi (keluaran berkas elektron) dari SE tiga elektroda jenis Pierce untuk berbagai nilai *perveance* sebagai fungsi beda tegangan antara katoda dan anoda seperti ditunjukkan seperti pada Gambar 4.

Makin besar beda tegangan antara katoda dan anoda maka makin besar keluaran berkas elektron yang dihasilkan, demikian halnya dengan *perveance*. Spesifikasi MBE lateks 300 kV/20 mA artinya bahwa mesin tersebut mampu mengeluarkan berkas elektron dari daerah vakum ke atmosfer melalui jendela Ti pada energi 300 keV dan arus 20 mA. Dengan asumsi bahwa efisiensi dari MBE lateks 60%, maka SE tiga elektroda jenis Pierce pada MBE tersebut harus mampu mengeluarkan arus berkas elektron minimal 33,33 mA. Pada arus minimal ini untuk beda tegangan katoda dan anoda 5 kV, 10 kV dan 15 kV masing-masing besarnya *perveance* $9,33 \times 10^{-8} \text{ AV}^{-3/2}$, $3,3 \times 10^{-8} \text{ AV}^{-3/2}$, dan $1,8 \times 10^{-8} \text{ AV}^{-3/2}$. Nilai ini lebih besar dari $10^{-8} \text{ AV}^{-3/2}$ maka efek muatan ruang tidak dapat diabaikan khususnya untuk tegangan katoda anoda 5 kV, efek ini dapat mengubah medan dan konsekuensinya mengubah bentuk berkas elektron.



Gambar 4. Keluaran SE 3 elektroda versus tegangan ekstraksi untuk berbagai *perveance*.

Gambar 5 memperlihatkan hasil simulasi sumber elektron 3 elektroda jenis Pierce menggunakan program komputer OPERA-3D mengenai pengaruh posisi filamen terhadap bentuk lintasan berkas elektron. Simulasi dilakukan pada beda tegangan katoda dan anoda pemfokus 5 kV, dan tegangan 12 kV dipasang pada elektroda kedua tabung pemercepat. Dalam penelitian ini hanya satu tabung akselerator yang digunakan agar mudah mengamati bentuk lintasan berkas elektron apabila terjadi perpotongan berkas (*beam cross-over*) pada sumbu aksial, divergensi, dan konvergensi. Karena sisa elektroda pada tabung pemercepat ada 8 maka beda tegangan antar elektroda pemercepat adalah 1,5 kV. Penempatan posisi filamen diukur relatif terhadap ujung lubang katoda Pierce yang diameternya 25 mm. Pada Gambar 5a dan 5b posisi filamen di muka lubang katoda Pierce pada posisi 3 mm dan 1,5 sedangkan pada Gambar 5c dan 5d posisi filamen di belakang lubang katoda Pierce pada posisi -2,5 mm dan -3,5 mm. Gambar 5a, 5b, 5c, dan 5d memperlihatkan garis bidang ekuipotensial yang sama namun menghasilkan lintasan berkas elektron yang keluar dari sumber elektron atau yang masuk ke tabung akselerator yang berbeda. Dari Gambar 5 terlihat bahwa posisi filamen sangat mempengaruhi bentuk lintasan berkas elektron.



Gambar 5. Pengaruh posisi filamen terhadap lintasan berkas elektron keluar dari SE.

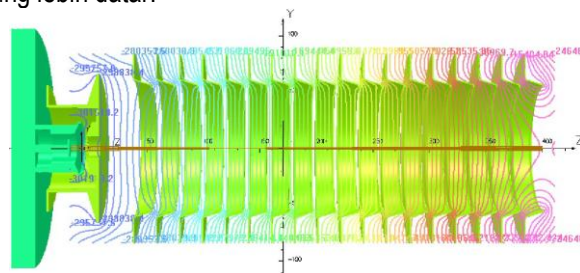
Untuk posisi filamen dimuka lubang katoda Pierce hasil simulasi menghasilkan berkas lintasan elektron yang divergen sebaliknya untuk posisi filamen di belakang lubang katoda Pierce hasil simulasi menghasilkan lintasan berkas elektron yang mendekati hampir sejajar. Hal ini dikarenakan untuk posisi filamen di muka lubang katoda Pierce maka awan elektron di sekitar filamen mengalami penarikan dan pemfokusan yang kuat karena beda tegangan katoda dan anoda pemfokus (V_{kf}) 5 kV sedangkan beda tegangan anoda pemfokus dan elektroda pemercepat 1,5 kV. Pemfokusan yang kuat ini menyebabkan terjadi perpotongan berkas (*beam cross-over*) di antara katoda dan anoda pemfokus kemudian berkas elektron ini masuk ke tabung pemercepat dengan penambahan energi tiap elektroda 1,5 keV. Untuk posisi filamen di belakang ujung lubang katoda Pierce tidak terjadi perpotongan berkas elektron di antara katoda Pierce dan anoda pemfokus. Hal ini dikarenakan ada sebagian awan elektron berada di belakang lubang katoda Pierce sehingga ketika ditarik dan dipercepat oleh anoda pemfokus, berkas elektron ini juga dibentuk oleh lubang katoda Pierce. Di samping itu awan elektron yang berada di belakang ujung lubang mengalami penarikan dan pemfokusan yang kurang kuat sehingga tidak terjadi perpotongan berkas di antara katoda Pierce dan anoda pemfokus. Konsekuensinya dalam hal ini berkas elektron yang keluar dari sumber elektron dan masuk ke tabung pemercepat mempunyai lintasan berkas elektron yang sedikit terdivergensi. Hasil percobaan yang dilakukan ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh N. Baltateanu dkk mengenai sumber elektron 3 elektroda untuk Linac [13].

Selanjutnya untuk mengamati lebih jauh bentuk lintasan berkas elektron pada MBE lateks sesungguhnya maka ditambah satu tabung pemercepat pada simulasi tersebut di atas sehingga sekarang ada 18 elektroda pemercepat. Simulasi dilakukan pada posisi filamen seperti pada Gambar 5d, dan pada elektroda kedua tabung pemercepat diberi tegangan sebesar 300 kV, kemudian diamati pengaruh beda tegangan katoda dan anoda pemfokus untuk 5 kV, 10 kV, dan 15 kV. terhadap bentuk lintasan berkas elektron seperti ditunjukkan pada Gambar 6a, 6b, dan 6c. Pada Gambar 6 terlihat bahwa garis bidang ekuipotensial di diantara katoda dan elektrode pemfokus berbentuk cembung mengikuti geometri elektrode pemfokus sehingga memberikan efek pemfokusan yang kuat. Sedangkan garis bidang ekuipotensial di antara anoda pemfokus dan anoda ekstraksi sebagian besar berbentuk datar dan sebagian lagi berbentuk sedikit cembung yaitu hanya pada awal masuknya

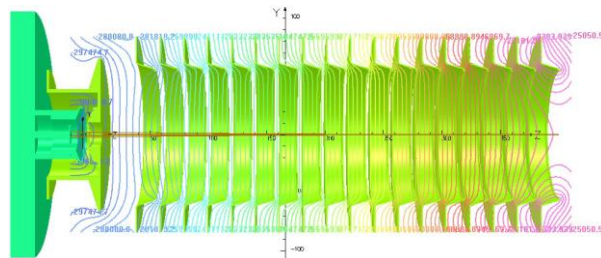
berkas elektron ke elektroda pemercepat sehingga mempunyai efek pemfokusan yang lemah. Bidang ekuipotensial di antara elektroda pemercepat bentuknya hampir datar sehingga mempunyai efek pemfokusan yang sangat lemah.

Lebih jauh jika hasil simulasi pada Gambar 6 dianalisis yaitu karena anoda pemfokus mempunyai ketebalan 6 mm maka bentuk garis bidang ekuipotensial melengkung ke arah sumbu Z positif untuk sisi masuk berkas dan ke arah Z negatif untuk sisi keluar berkas dengan Z' adalah sumbu aksial tabung pemercepat. Dengan bentuk ini maka pada celah (lubang) anoda pemfokus di sisi masuk memberikan efek penyebaran dan di sisi keluar memberikan efek pemfokusan. Efek penyebaran dan pemfokusan di sekitar anoda pemfokus sangat dipengaruhi oleh besar medan listrik antara katode dan anoda pemfokus dan anoda pemfokus dan anoda ekstraksi pada elektrode tabung akselerator. Pada Gambar 6a berkas elektron ke luar dari sumber elektron sudah mempunyai energi sekitar 5 keV yang diperoleh dari beda tegangan katode dan anoda pemfokus 5 kV. Dengan energi ini, berkas elektron saat keluar dari sumber elektron dan masuk ke tabung akselerator mempunyai ketegaran (*rigidity*) yang cukup besar. Dengan rigiditas ini agak susah dibelokkan dan terbukti dari hasil simulasi baru terjadi perpotongan berkas pada jarak sekitar 125 mm, titik fokus ini lebih jauh 50 mm jika dibandingkan dengan kondisi katode-anoda pemfokus dihubungkan [14].

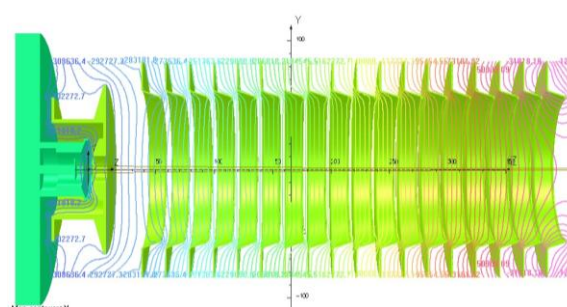
Untuk beda tegangan katode dan anoda pemfokus 10 kV dan 15 kV bentuk bidang ekuipotensial hampir sama dengan untuk beda tegangan katode dan anoda pemfokus 5 kV, namun perbedaannya pada daerah katode dan anoda pemfokus yang beda potensial lebih tinggi sehingga berkas elektron keluar dari sumber elektron mempunyai energi yang lebih tinggi. Pada sisi masuk, garis bidang ekuipotensial cenderung lebih dalam dari pada sisi keluar cenderung lebih datar.



6a) $V_{kf}=5$ kV



6b) $V_{kf}=10$ kV



6c) $V_{kf}=15$ kV

Gambar 6: Pengaruh beda tegangan katoda dan anoda pemfokus pada titik fokus berkas.

Dari bentuk garis bidang ekuipotensial ini maka makin tinggi beda tegangan katode dan anoda pemfokus makin besar efek penyebaran dan makin kecil efek pemfokusannya. Akibatnya di dalam sumber elektron untuk beda katoda dan anoda pemfokus lebih besar 5 kV maka berkas elektron mempunyai efek pemfokusan lebih kecil karena berkas elektron mempunyai energi lebih tinggi sehingga mempunyai rigiditas yang lebih tinggi dan konsekuensinya berkas elektron tidak mudah dibelokkan atau difokuskan. Di samping itu, di daerah masuk anode disebarkan lebih besar dan di daerah keluar difokuskan lebih kecil. Hal ini dibuktikan dari hasil simulasi bahwa makin besar tegangan katode dan anode pemfokus maka makin jauh jarak fokus berkas elektron yang dihasilkan. Jarak fokus untuk beda tegangan katode anode pemfokus 5 kV sekitar 125 mm, sedangkan untuk beda tegangan katode dan anode pemfokus 10 kV sekitar 250 mm dan untuk beda tegangan katode dan anode pemfokus 15 kV hampir tidak terjadi persilangan berkas elektron dengan sumbu berkas.

Hasil penelitian simulasi sejenis dilakukan oleh B.J. Patil et al. [7] menggunakan program komputer SIMION-7 untuk merancang sumber elektron tipe tetrode dengan bagian-bagian utama: katoda, anoda pemfokus, anoda dan elektrode pengontrol. Simulasi dilakukan dengan tegangan katoda, pemfokus dan anoda tetap dan tegangan elektrode pengontrol divariasi. Hasil simulasinya menunjukkan bahwa lintasan berkas elektron terfokus dan terjadi titik fokus di sekitar elektrode pemfokus, selanjutnya menyebar kembali dengan makin besar tegangan elektrode pengontrol makin kecil penyebaran kembali berkas elektron yang keluar dari sumber elektron.

Penelitian simulasi sejenis juga dilakukan oleh J. Lee et al. [15] menggunakan EGN2w dan CST-Particle Studio untuk mendesain dan analisis berkas elektron dalam sumber elektron untuk radiotherapi sinar X. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa lintasan berkas elektron terfokus dan sampai ke luar dari sumber elektron belum terjadi titik fokus baik untuk simulasi dengan EGN2w maupun CST-Particle Studio. Lebih lanjut simulasi sejenis dilakukan oleh M. M. Abdelrahman [16] dengan variasi tegangan anoda menunjukkan bahwa makin besar tegangan anoda maka berkas elektron makin terfokus serta diameter dan daya pancar (*emittance*) berkas minimum diperoleh pada tegangan anoda 29,35 kV. Untuk simulasi yang dilakukan oleh J. Lee et al. dan M. M. Abdelrahman, jenis sumber elektron yang disimulasikan adalah hampir sama yaitu sumber elektron dengan bagian-bagian utama: elektrode emitor, anoda pemfokus dan anoda sehingga dihasilkan lintasan berkas elektron yang mendekati sama.

Jika dicermati geometri sumber elektron yang disimulasikan mempunyai perbedaan sehingga mempengaruhi pembentukan bidang ekuipotensial dan arah penambahan energi (pemercepatan) berkas elektron sehingga berdampak pada hasil pemfokusan yang berbeda. Hal ini memperkuat hasil simulasi yang dilakukan pada penelitian ini. Didasarkan hasil simulasi diperoleh lintasan berkas elektron terbaik untuk MBE lateks adalah untuk beda tegangan katode dan anode pemfokus 15 kV hal ini dikarenakan tidak terjadi perpotongan berkas elektron dengan sumbu aksial tabung pemercepat dan penyebaran berkas elektron kecil di dalam tabung pemercepat.

Konstruksi dan Karakterisasi Sumber Elektron

Gambar 7a adalah modul sumber elektron 3 elektrode jenis Pierce hasil konstruksi dan Gambar 7b adalah tabung pemercepat NEC sebagai ruang sumber elektron dan anoda ekstraksi. Pada modul sumber elektron ini dimuat filamen, dan katoda Pierce yang menyatu dengan *flange* DN-160 CF sedangkan anoda pemfokus terisolasi dengan *flange*. Isolasi anoda pemfokus dengan katoda Pierce menggunakan bahan teflon yang dirancang mampu menahan tegangan dadal 30 kV. Sumber elektron hasil konstruksi ini telah dilakukan karakterisasi yang meliputi bentuk profil dan keluaran berkas elektronnya.

Tabel 2 memperlihatkan pengaruh tegangan anoda pemfokus dan anoda ekstraksi terhadap bentuk profil berkas elektron. Terlihat dari Tabel 2 bahwa tegangan pemfokus dominan pada pembentukan profil berkas elektron, sedangkan tegangan anoda ekstraksi berpengaruh pada intensitas keluaran berkas elektron. Pada tegangan anoda ekstraksi yang tetap terlihat bahwa untuk tegangan pemfokus yang makin besar bentuk profil menjadi lebih baik. Sedangkan pada tegangan anoda pemfokus yang tetap, makin besar tegangan anoda ekstraksi maka makin terang intensitas berkas elektron. Dengan kata lain makin besar tegangan anoda ekstraksi maka makin besar arus berkas elektron yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan prediksi secara terori pada Gambar 4. Dari Tabel 2 terlihat bahwa di atas tegangan pemfokus 5 kV bentuk profil berkas elektron tidak lagi dipengaruhi oleh tegangan pemfokus. Hal ini diduga bahwa semua berkas elektron sudah terarah dengan

kata lain untuk tegangan pemfokus di bawah 5 kV medan listrik yang dihasilkan belum cukup untuk mengarahkan semua berkas elektron.



Gambar 7a. Modul sumber elektron.

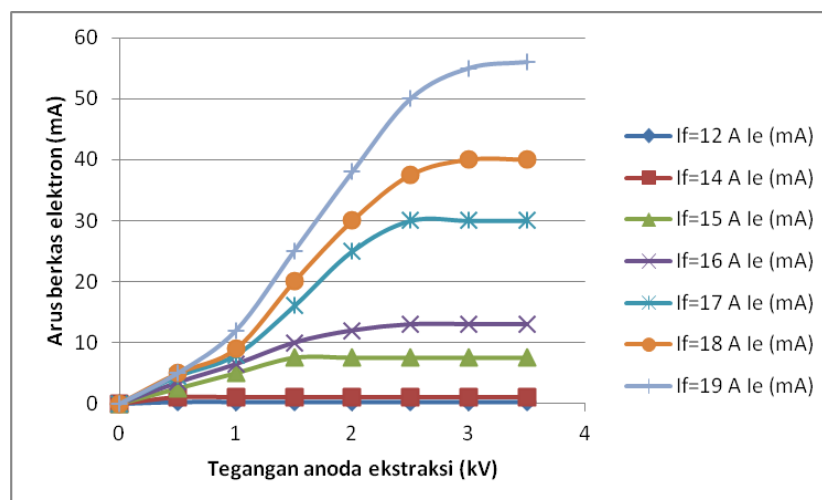
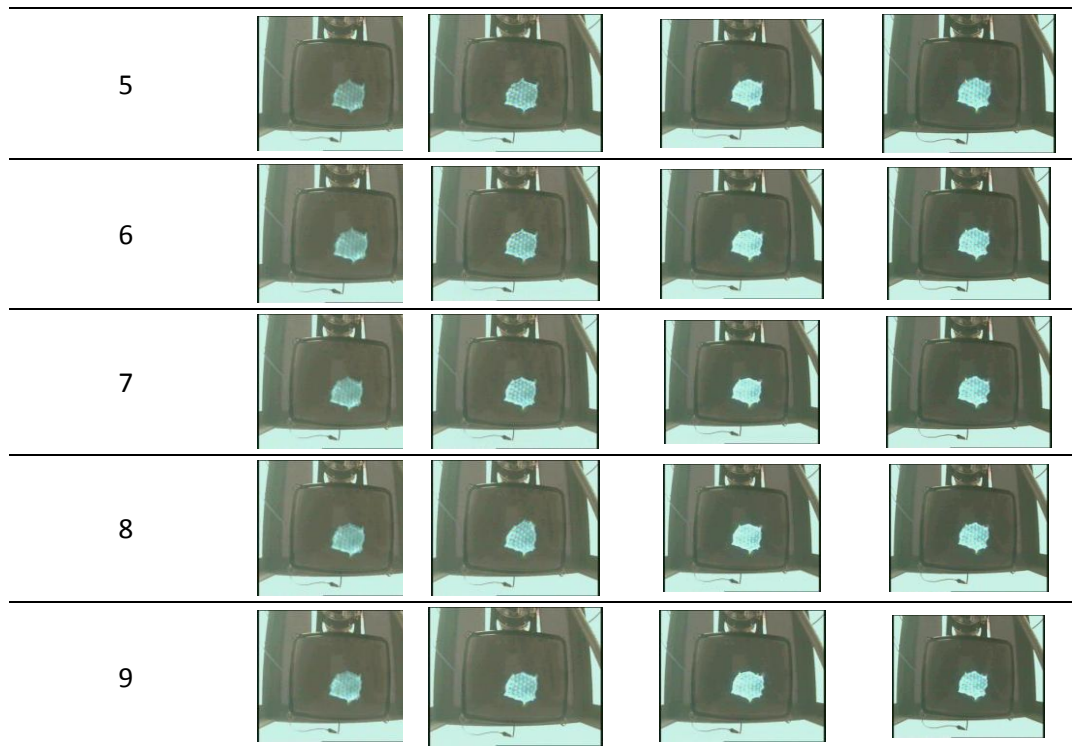


Gambar 7b Tabung pemercepat.

Hasil uji fungsi sumber elektron 3 elektroda jenis Pierce untuk berbagai arus filamen (I_f) ditunjukkan pada Gambar 8. Terlihat dari Gambar 8 bahwa jika tegangan anoda ekstraksi dinaikkan maka besar arus berkas elektron meningkat sampai batas tertentu kemudian terjadi saturasi pada tegangan anoda ekstraksi 3 kV. Hal ini sesuai dengan hukum Child-Langmuir seperti tertulis pada persamaan (2) bahwa densitas arus emisi elektron yang dibatasi oleh muatan ruang yang dapat diekstraksi dari ruang sumber elektron ke ruang tabung pemercepat berbanding lurus $KV^{3/2}$. Besarnya arus berkas elektron yang dihasilkan ini sudah memenuhi spesifikasi SE untuk MBE lateks.

Tabel 2. Hasil pengukuran profil berkas elektron SE 3 elektroda jenis Pierce untuk berbagai tegangan anoda pemfokus dan anoda ekstraksi.

Tegangan Anoda pemfokus (kV)	Tegangan tabung pemercepat (tegangan anoda ekstraksi (kV))			
	4	6	8	10
0				
1				
2				
3				
4				



Gambar 8. Pengaruh tegangan anoda ekstraksi terhadap keluaran arus berkas SE.

KESIMPULAN

Posisi filamen relatif terhadap ujung lubang katoda Pierce dari SE 3 elektroda sangat mempengaruhi bentuk lintasan berkas demikian halnya dengan besarnya tegangan pemfokus untuk tegangan anoda ekstraksi yang tetap. Posisi filamen di belakang ujung lubang katoda Pierce menghasilkan bentuk lintasan berkas lebih konvergen dibandingkan dengan posisi filamen di muka ujung katoda Pierce. Makin tinggi tegangan pemfokus untuk SE dengan 2 tabung pemercepat pada posisi filamen -2,5 mm di belakang ujung katoda Pierce menghasilkan jarak titik fokus makin besar, dan pada V_{kf} 15 kV menghasilkan lintasan berkas yang sejajar. Profil berkas elektron sangat ditentukan oleh tegangan anoda pemfokus. Besarnya keluaran arus berkas elektron sangat ditentukan oleh tegangan elektroda ekstraksi dengan hasil terbesar 50 mA. SE yang dibuat ini memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan untuk MBE lateks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ka. PSTA-BATAN yang telah mengalokasikan anggaran DIPA tahun 2015 dan 2016, Bapak Sukidi, Sumaryadi dan Suhartono atas bantuan yang telah diberikan untuk menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Darsono, "Peran Teknologi Akselerator Dalam Mendukung Industri" *Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya* Vol.10, PTAPB-BATAN, hal. xvii-xxix, Oktober 2008.
- [2] Wilson A. Parejo Calvo, et.al, "Electron beam accelerators: trends in radiation processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean", *Radiation Physics and Chemistry*. Volume 81, Issue 8, pp. 1276–128, 2012.
- [3] V.M. Tsakanov, "AREAL low energy electron beam applications in life and materials sciences", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 829, Issue 1, pp. 248–253, 2016.
- [4] Darsono, "MBE Skala Industri Untuk Produksi Lateks Karet Alam Iradiasi: Manufaktur, Pangsa Pasar, dan Teknoekonomi LKAI", *Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Vol.11, , PTAPB-BATAN, hal. 91-101, Oktober 2009.
- [5] C. J. Ruan, X. L. Wu, Q. S. Li, and C. S. Li, "Development of High Power Electron Beam Measuring and Analyzing System for Microwave Vacuum Electron Devices," *Phys. Procedia*, vol. 32, no. i, pp. 58–62, 2012.
- [6] A.Kaur, C. Ribton, and W. Balachandaran, "Electron beam characterisation methods and devices for welding equipment," *J. Mater. Process. Technology*, vol. 221, pp. 225–232, 2015.
- [7] A.J. Patil, V. N. Bhoraskar, and S. D. Dhole, "Design , development and characterization of tetrode type electron gun system for generation of low energy electrons," *Indian J. Pure Appl. Physic*, vol. 50, pp. 482–485, 2012.
- [8] S. P. Djoko and Suprpto, "Pengujian Sumber Elektron pada MBE untuk Aplikasi Industri Lateks," in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, vol. 9, PTAPB-BATAN, pp. 1–9, 2007.
- [9] A. E.-S. Safwat G.zakhary, Magdi S.Ragheb, Ahmad Elfalaaky, "Investigation of beam performance parameters in a pierce-Type electron gun," *Sci. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 191–197, 2012.
- [10] Ghalib ul Islam, Abdul Rehman, Munawar Iqbal, Z. Zhou,"Simulation and test of a thermionic hairpin source DC electron beam gun ", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 127, Issue 4, pp. 1905-1908, 2016.
- [11] Siegfried Schiller, Ullrich Heisig, Siegfried Panzer, *Electron beam technology*, Jhon Wiley & Sons, New York, 1982.
- [12] Darsono, Suhartono, Suprpto, Elin Nuraini, :Pengukuran bentuk profil berkas elektron dari sumber elektron tipe Pierce menggunakan sensor tabung TV bekas", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Volume 17, PSTA-BATAN hal 85-91, Nopember 2015.
- [13] N. Baltateanu, A.Gheorghiu, M. Jurbă, E. Popescu, "Characteristics of the beam injection system in an electron LINAC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 269, Issue 24, pp. 2882-2885, 2011.
- [14] Suprpto, Darsono, Elin Nuraini, Taufik, "Modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkas elektron pada tabung pemercepat MBE di PSTA", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Volume 17, PSTA-BATAN, hal 76-84, Nopember 2015.
- [15] J. Lee, H. Kim, M. Ghergherehchi, S. Shin, and Y. Lee, "Design and Analysis of an Electron Beam in an Electron Gun for X-Ray Radiotherapy," in *Proceedings of IPAC2014*, pp. 1–4. 2014.
- [16] M. M. Abdelrahman, "Simulation Study for Electron Gun Using Simion Computer Program," *J. Asian Sci. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 275–285, 2013.